



Commande optimale de capteurs ultrasonores pour la détection de défauts présents dans des matériaux complexes non-linéaires

Sébastien Ménigot, Nesrine Houhat,
Volodymyr Gatsa, Jean-Marc Girault &
Vincent Tournat

sebastien.menigot@eseo.fr

Introduction

Système d'imagerie ultrasonore



Aixplorer, SuperSonic Imagine, 2005
≈ 100 k€

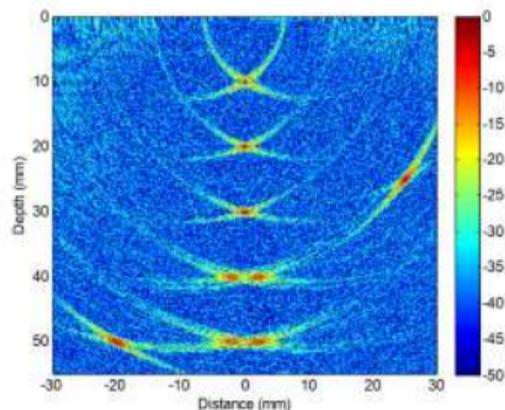
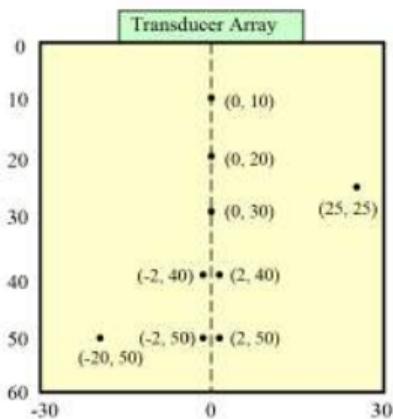


Butterfly iQ, 2018
2 k\$ + abonnement

Système d'imagerie ultrasonore en CND



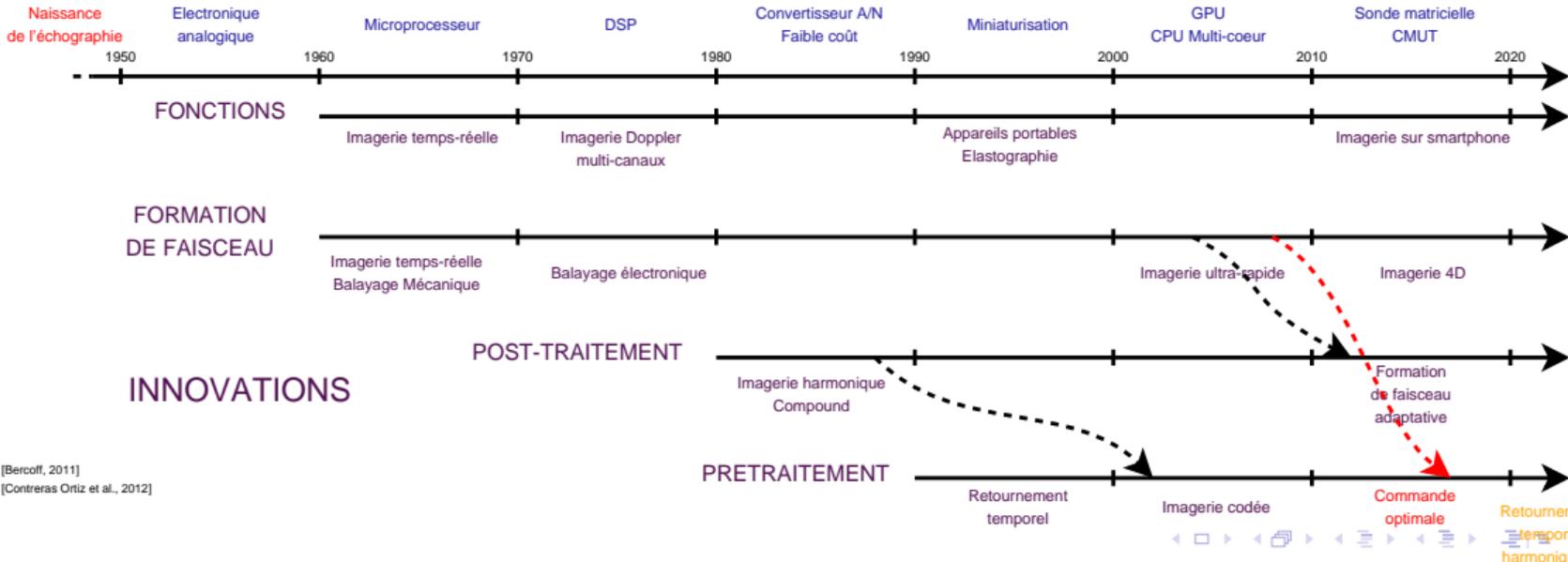
Tournat, 2014



Li, 2012

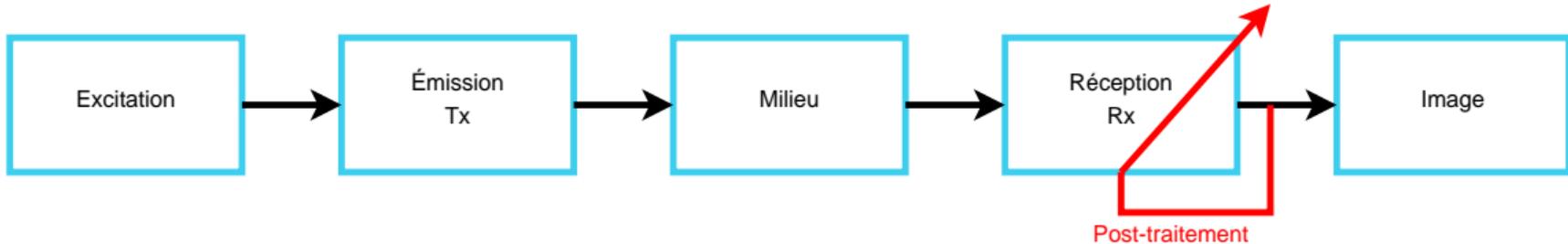


TECHNOLOGIES

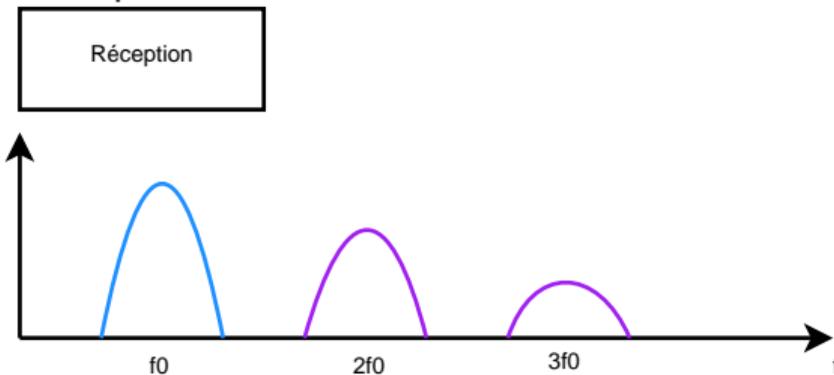
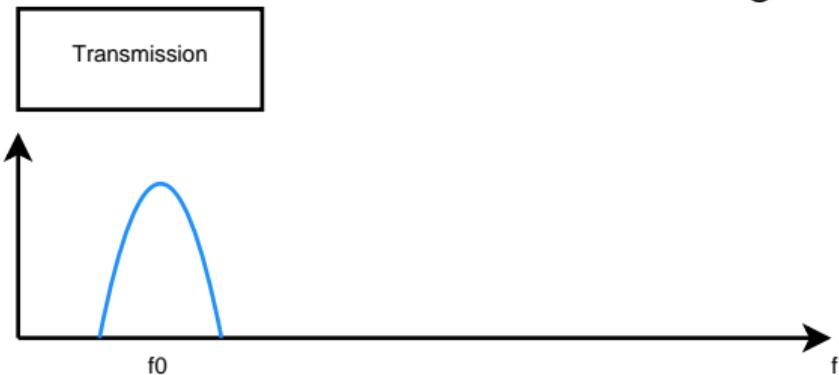


[Bercoff, 2011]
[Contreras Ortiz et al., 2012]

Système d'imagerie ultrasonore non linéaire



Imagerie harmonique



Syst. d'imagerie ultrasonore NL (milieu mou)

Imagerie d'impédance acoustique pondérée par le coefficient non linéaire B/A

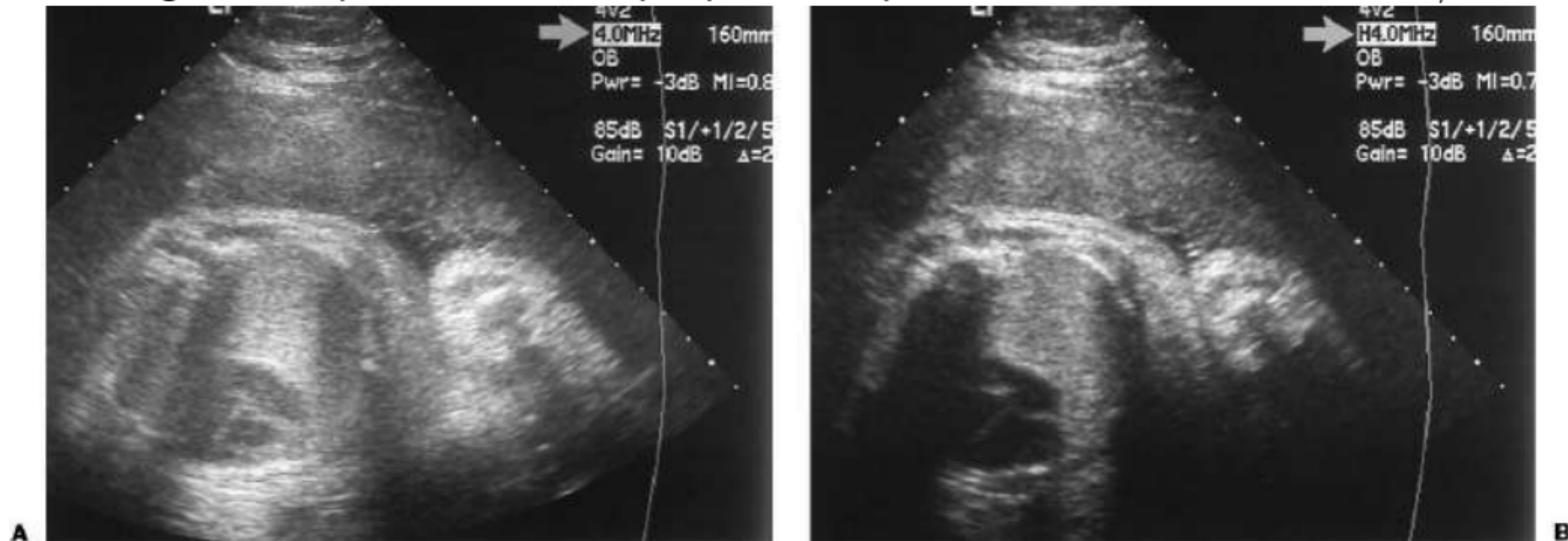
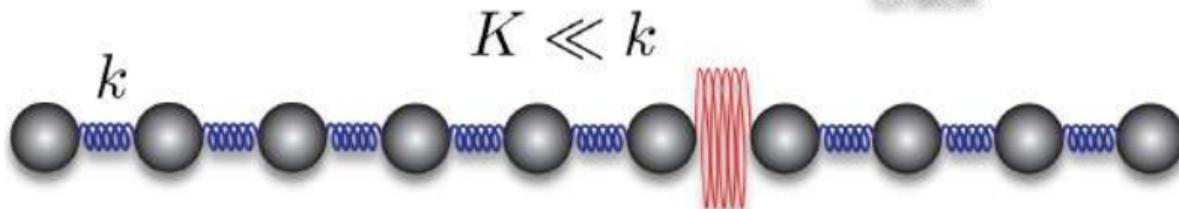


Image d'un cœur de fœtus — A : Image fondamentale / B : Image harmonique

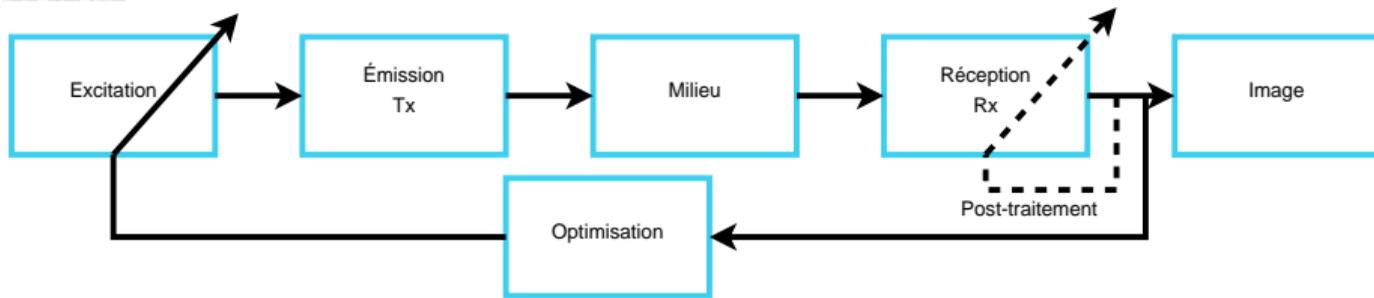
W. E. Brant, *The Core Curriculum: Ultrasound* (1^{re}édition), Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphie, États-Unis d'Amérique

Syst. d'imagerie ultrasonore NL (solide et crack)

Nonlinéarité de crack

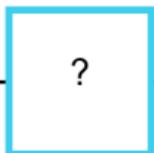
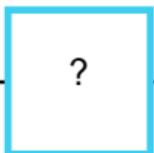


Tournat, 2012



Quelle est la commande qui **optimise** la qualité de l'image ?

Transmission

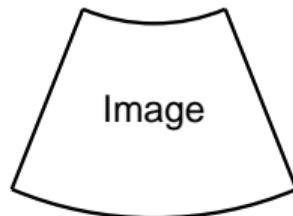


t

Réception



t



Image

Critère

OPTIMAL

Résolution de la commande optimale

Paramétrique

- Solution sous-optimale
 - ▶ Fréquence
 - ▶ Modulation de fréquence
 - ▶ Rapport des composantes harmoniques
 - ▶ **Intermodulation**
- **Solution optimale : commande optimale stochastique**
 - ▶ Design optimal temporellement, sans hypothèse sur la forme d'onde
 - ▶ Itératif
 - ▶ Si le milieu est linéaire, on retrouve la solution du retournement temporel

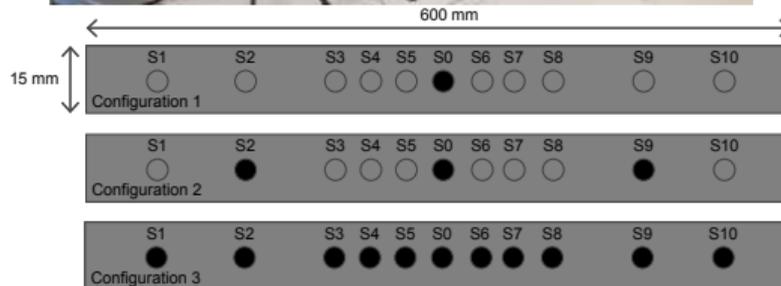
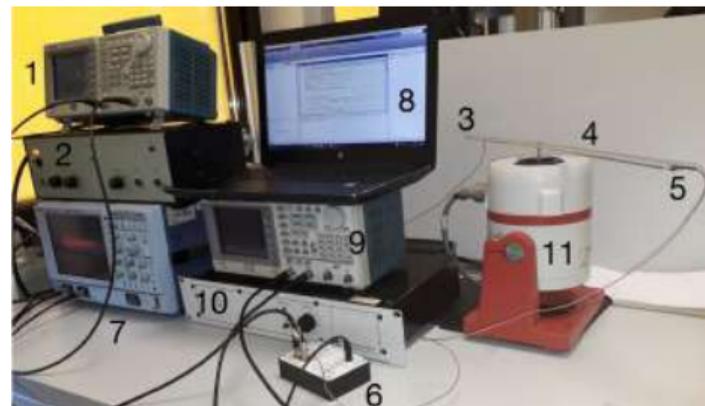
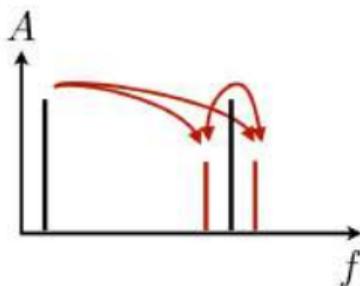
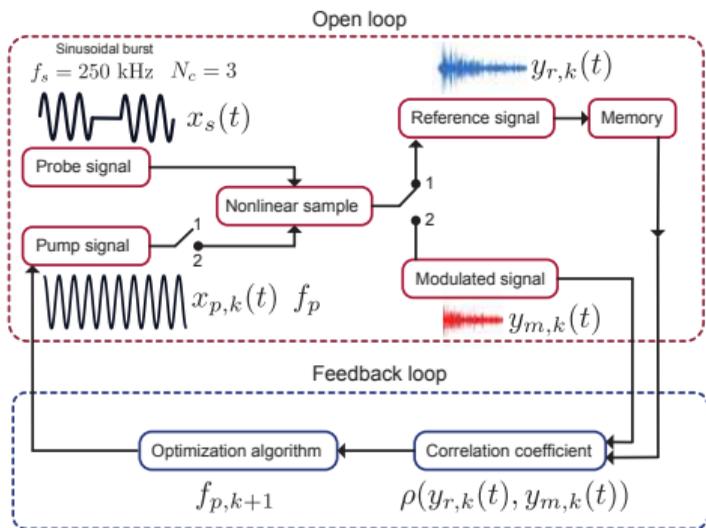
Non-paramétrique

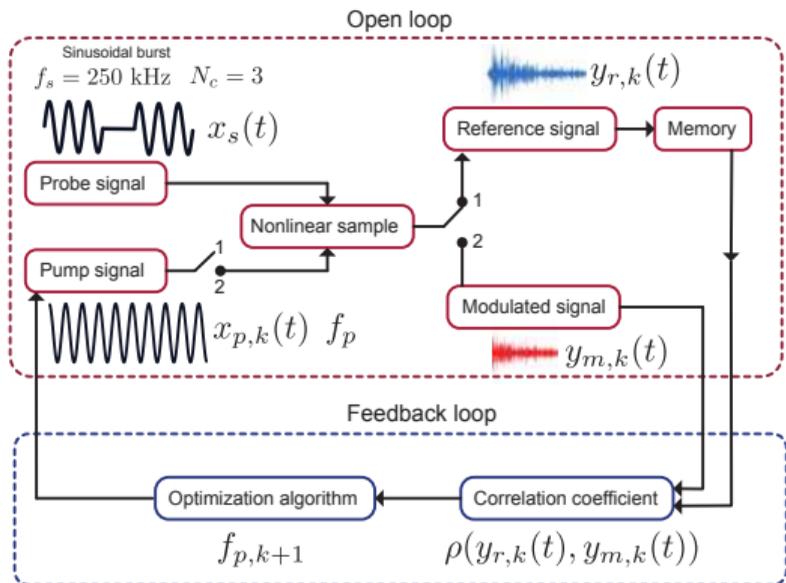
- **Uniquement pour les systèmes linéaires**
 - ▶ Retournement temporel [Fink, IEEE T UFFC, 1992]
 - ▶ Filtre adapté
- Tentative pour les systèmes nonlinéaires [Ménigot et al., IEEE IUS, 2016]

Solutions paramétriques

Optimisation de la fréquence pompe en modulation vibro-acoustique

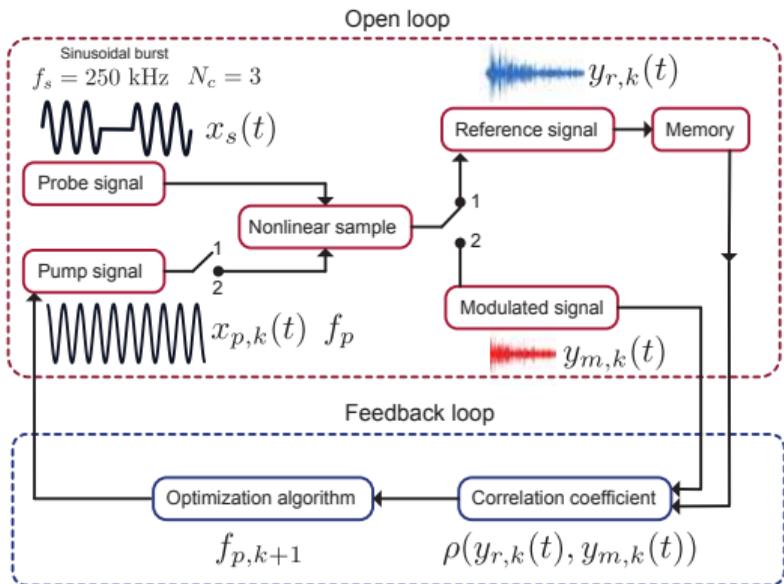
Optimisation de la fréquence pompe en modulation vibro-acoustique





Réglage de l'optimisation itérative

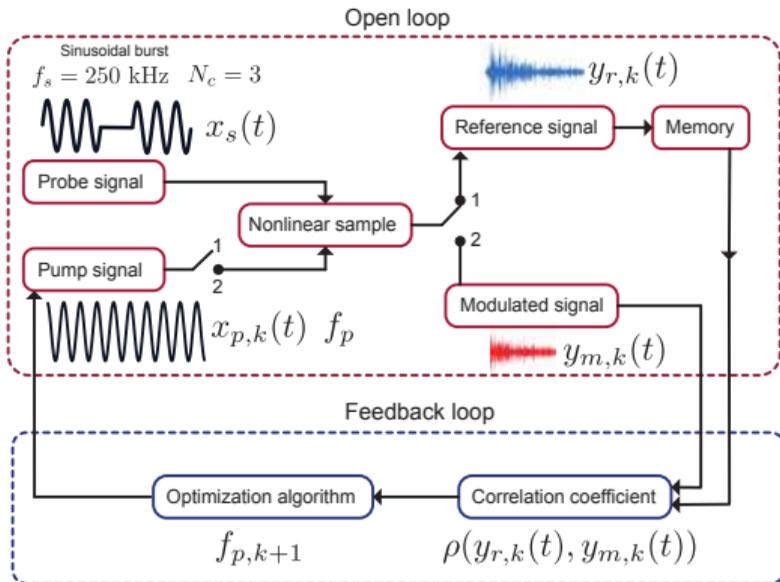
- 1 Détection : choix de la fonction de coût $J(\theta)$
 - ▶ Objectif : faciliter la détection de défauts
 - ⇒ Augmenter les nonlinéarités générées par les défauts
- 2 Description de la forme d'onde
- 3 Optimisation : choix de l'algorithme d'optimisation
 - ↔ Optimisation par algorithme génétique



Réglage de l'optimisation itérative

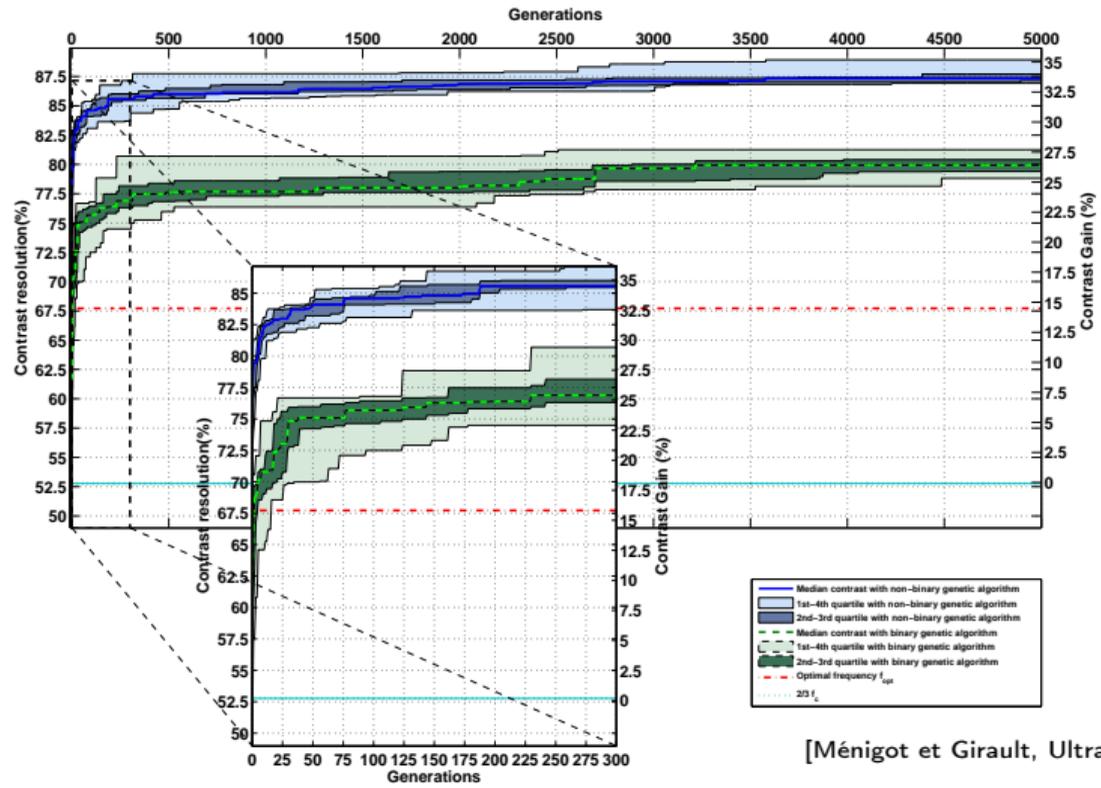
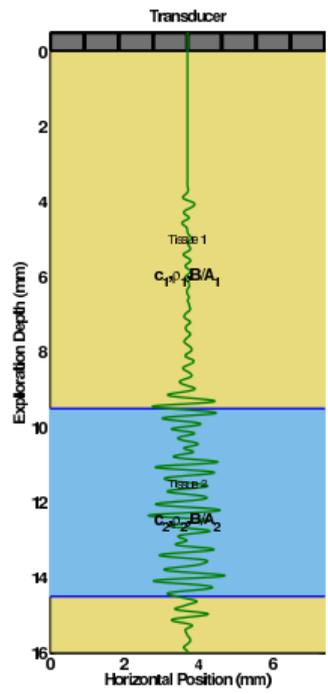
- 1 Détection : choix de la fonction de coût $J(\theta)$
- 2 Description de la forme d'onde
 \hookrightarrow Onde déterministe : hypothèse sur la forme de l'onde pompe \rightarrow paramètres descriptifs θ : fréquence f_p de la pompe
- 3 Optimisation : choix de l'algorithme d'optimisation
 \hookrightarrow Optimisation par algorithme génétique

Optimisation de la fréquence pompe en modulation vibro-acoustique



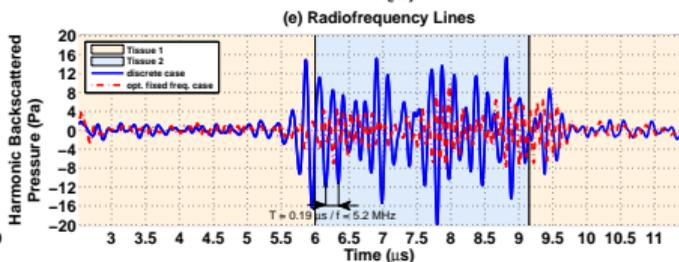
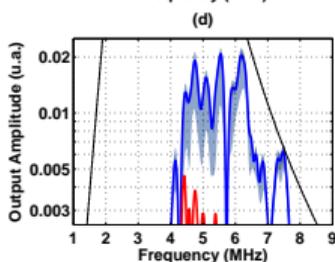
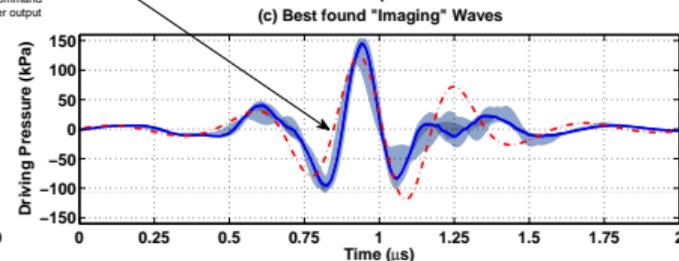
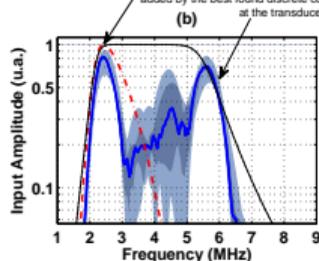
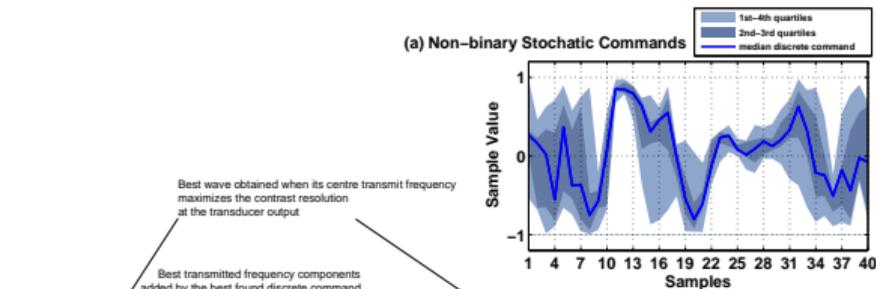
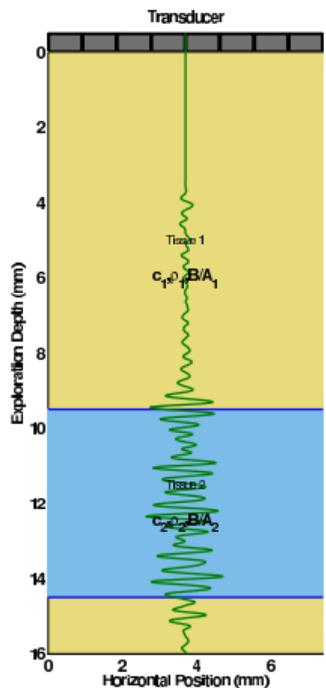
- ## Réglage de l'optimisation itérative
- 1 Détection : choix de la fonction de coût $J(\theta)$
 - 2 Description de la forme d'onde
 - 3 Optimisation : choix de l'algorithme d'optimisation
 ↪ Optimisation par algorithme génétique

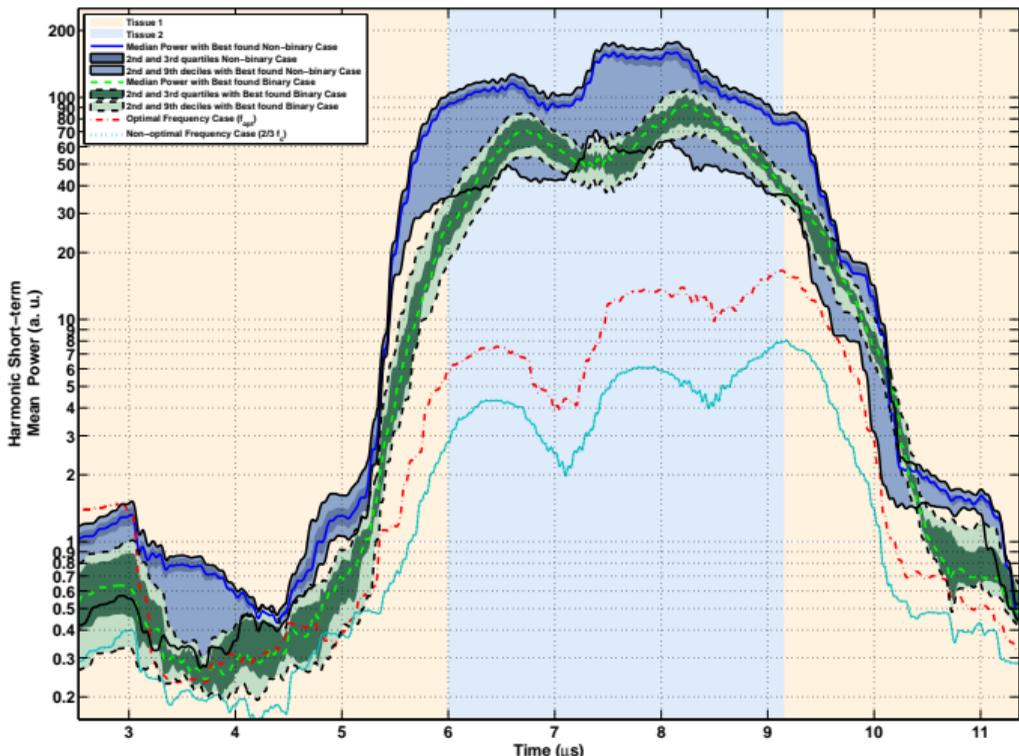
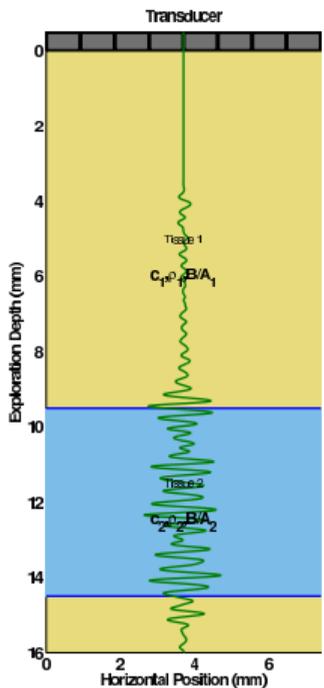
Commande optimale stochastique



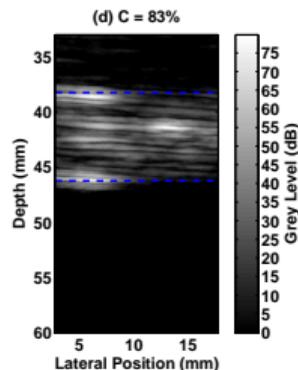
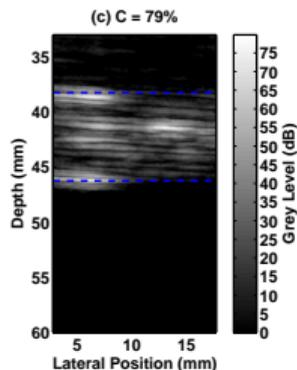
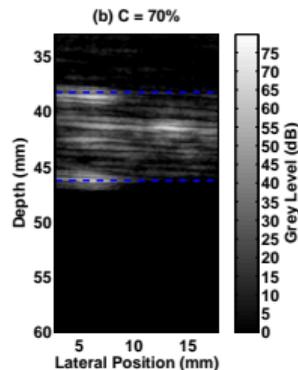
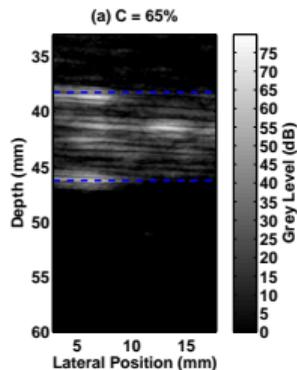
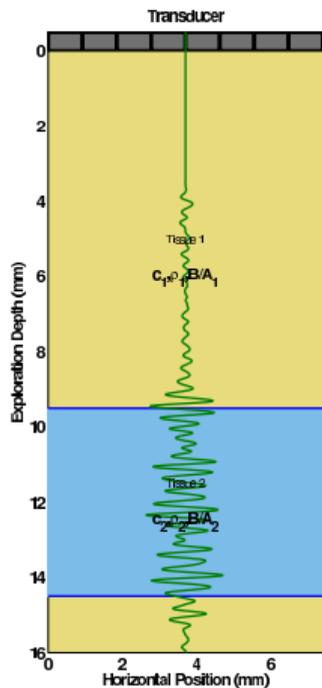
[Ménigot et Girault, Ultrasonics, 2016]

Optimisation des échantillons de la commande par algorithme génétique





Optimisation des échantillons de la commande par algorithme génétique



Solution non paramétrique

Retournement temporel

Propagation linéaire \Leftrightarrow Système linéaire

Équation d'onde linéaire avec source sans atténuation :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = S(x_0, t)$$

Discrétisation de l'équation aux dérivées partielles avec $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{u(x, t - \Delta t) - 2u(x, t) + u(x, t + \Delta t)}{\Delta t^2}$
EDP devient:

$$u(x, t + \Delta t) = \frac{1}{1 - \frac{c^2 \Delta t^2}{\Delta x^2}} \left[2c^2 \Delta t^2 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{c^2 \Delta t^2} \right) u(x, t) - u(x, t - \Delta t) + \frac{c^2 \Delta t^2}{\Delta x^2} u(x, t - 2\Delta t) \right] + S \left(x_0, t - \frac{x - x_0}{c} \right)$$

Puisque la source rayonne, on pose: $u(x, t - k\Delta t) = S \left(x_0, t - \frac{x - x_0}{c} - k\Delta t \right)$

Donc:

$$u(x, t + \Delta t) \propto \sum_k b_k S \left(x_0, t - \frac{x - x_0}{c} - k\Delta t \right) \Rightarrow \text{Filtre MA d'entrée } S(t) \text{ et de sortie } u(t)$$

Retournement temporel

Avantages

- Simple
- Rapide (une onde exploratrice et une onde imageante)
- Plus le milieu est complexe, meilleure est l'optimisation

Inconvénients

- Ne maximise le SNR que de la composante linéaire
- ↪ Annihilation des composantes harmonique
- ⇒ Pas adapté pour l'imagerie harmonique

Remarque pour l'imagerie

Nécessité de réaliser 2 retournements temporels successifs

- 1 Créer une excitation optimale, mais dont les échos arrivent au même instant
- 2 Séparer les composantes

Conclusion

Conclusion

Conclusion

- Design temporel de l'onde
- Adaptatif : milieu, non-linéarité, transducteur, électronique, ...
- ↪ Itératif : quelques itérations suffisent pour dépasser les performances standards

Perspectives

- Application aux milieux solides en présence de cracks avec ou sans pompe
- ↪ thèse de V. Gatsa
- Généralisation du retournement temporel pour l'imagerie harmonique
- ↪ Design "spatio-temporel" optimal



Merci de votre attention

sebastien.menigot@eseo.fr